

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Hospodaření s přírodními zdroji



Alice Erlebachová

Interpretace paleoprostředí spodnomiocénních jezerních jílu cyprisového souvrství sokolovské pánve
na základě studia prvkových geochemických proxy ve vrtu Jp-585

Paleoenvironmental interpretation of elemental geochemical proxies of the borehole Jp 585: Lower
Miocene lacustrine offshore clays of Cypris Formation, Sokolov Basin

Bakalářská práce

Vedoucí závěrečné práce: Mgr. Karel Martínek, Ph.D.

Konzultant: RNDr. Tomáš Matys Grygar, CSc.

Praha 2011

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 1. 9. 2011

Podpis

Poděkování:

Ráda bych zde poděkovala vedoucímu bakalářské práce Mgr. Karlu Martínkovi, Ph.D. a konzultantovi RNDr. Tomáši Matysu Grygarovi, CSc. za jejich rady a čas, který mi věnovali při řešení dané problematiky. Dále děkuji všem respondentům, kteří mi poskytli potřebné informace, jmenovitě RNDr. Petru Rojíkovi, Ph.D. A v neposlední řadě také děkuji Petru Vormovi a zaměstnancům Analytické laboratoře v Řeži za pomoc a trpělivost.

ABSTRAKT

Tato práce prezentuje geochemickou studii spodnomiocénních jezerních sedimentů cyprisového souvrství sokolovské pánve. Zjišťuje se v ní, jsou-li základní geochemická proxy aplikovatelná na interpretaci 94 m mocného litologicky monotónního sledu jezerních jílových sedimentů ve vrtu Jp 585. Geochemická proxy data se ukázala být poměrně dobrým záznamem vývoje zdrojových oblastí sedimentů a klimatických změn ve spodním miocénu. S pomocí analýzy XRF je dobře znát např. pokles obsahu siliciklastik ve prospěch autigenního SiO_2 , karbonátů a dalších autigenních minerálů ve svrchní části profilu. Analýza CEC potom ukazuje velmi rychlé změny v obsahu expandabilních jílových minerálů, přičemž nejmarkantnější „skok“ je kolem 40. metru hloubky. Kombinace XRF a CEC nakonec umožnila navrhnout 4 dílčí chemostratigrafické jednotky. Hranice mezi některými z nich jsou poměrně ostré, což zřejmě znamená podstatné změny ve vývoji jezera. Ty jsou předběžně interpretovány jako klimatické změny.

SUMMARY

This thesis presents geochemical study of the Lower Miocene lacustrine offshore clays of the Cypris Formation in the Sokolov Basin of the Eger Graben aimed at paleoenvironmental reconstruction. The applicability of elemental geochemistry proxies in the interpretation of 94 m thick lithologically monotonous, offshore lacustrine clay succession of the well core Jp 585 is tested. Geochemical proxy data seems to be a good indicator of changes in source areas, erosion rates and climate. XRF analysis shows for example decrease of detrital input and the increase in amount of authigenic silica and carbonates upwards in the section. The results of CEC analysis point to a rapid variations of expandable clay minerals content. Marked increase of CEC is at 40 m depth. Combination of XRF and CEC enabled suggesting of four chemostratigraphical units. Their boundaries are often sharp, pointing to rapid changes in lake metabolism. These changes are preliminary interpreted as climate changes.

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Klima ve spodním miocénu.....	1
3. Cyprisové souvrství sokolovské pánve.....	3
3.1. Oherský rift.....	3
3.2. Sokolovská pánev.....	4
3.3. Cyprisové souvrství.....	8
4. Paleoklimatická proxy ve vrtu Jp-585.....	13
4.1. Úvod.....	13
4.2. Data a metody.....	13
4.3. Výsledky a interpretace.....	15
4.4. Diskuse výsledků.....	19
5. Závěry.....	21

1. Úvod

Má práce je součástí projektu GAČR „Jezerní a uhelné sedimenty sokolovské pánve jako archiv miocenního kontinentálního paleoprostředí, paleoklimatu a tektoniky“ řešeného v letech 2009 - 2011, ve kterém se kombinují poznatky ze sedimentologie, magnetostratigrafie, geochemie a biostratigrafie, a účelem je poznat lépe období spodního miocénu. Vhodným kontinentálním prostředím pro získání paleoklimatických dat jsou velká hluboká jezera s možností nepřerušované sedimentace. Jíly cyprisového souvrství, které jsou předmětem studia této práce, reprezentují denudační reliktu předbřežních sedimentů většího jezera s kontinuální sedimentací bez podstatnějších hiátů.

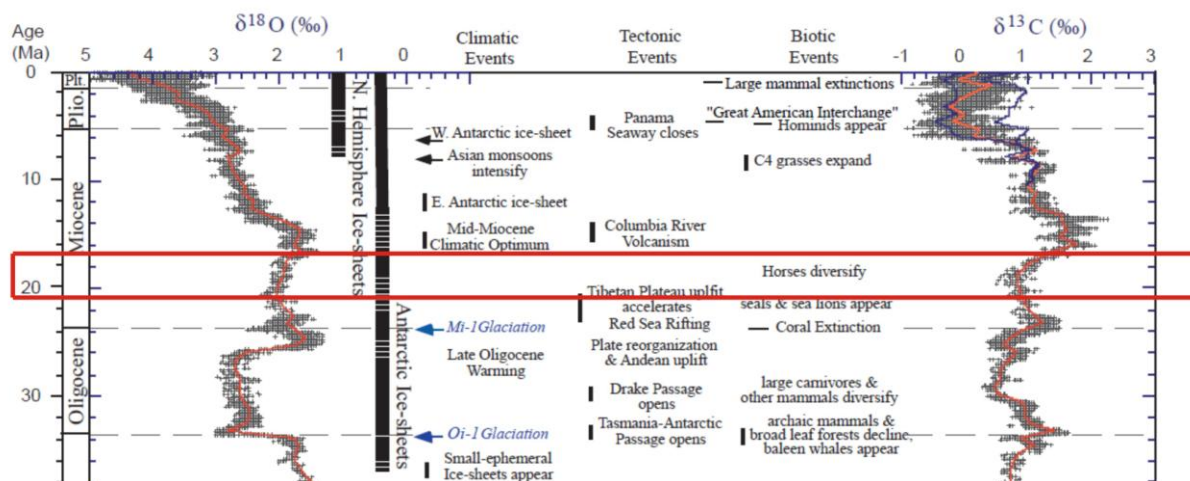
Tato práce prezentuje v druhé kapitole rešerši o klimatu ve spodním miocénu se zaměřením na jezerní klimatické archivy a ve třetí kapitole rešerši regionálních souvislostí sokolovské pánve a stručně podává současný stav poznání cyprisového souvrství. Čtvrtá kapitola prezentuje výsledky analýz prvkové geochemie jezerních jílu, které byly prováděny v Analytické laboratoři Ústavu anorganické chemie AVČR v Řeži ve spolupráci s PřF UK v Praze a na kterých jsem se podílela. Diskutuje také možné interpretace výsledků, které jsou shrnuty v páté závěrečné kapitole.

2. Klima ve spodním miocénu

Období miocénu (cca 24 – 5,5 Ma) je charakteristické jako klidné období s relativně vyššími teplotami (Tall-Zamaloa 2004). V důsledku vyšších teplot bylo tedy menším zaledněním pólů, což souvisí se vznikem severoatlantského hlubokomořského proudu (North Atlantic Deep Water), který vznikl uzavřením průlivu mezi Středozemním a Indickým oceánem (Hay et al., 2002). Je to tedy období vhodné pro výzkum paleoklimatu. V poslední době se objevují vědecká sdělení o klimatických výkyvech i kolísání hladiny oceánu i v tomto zdánlivě "bezledovcovém období", které vyvolávají otázky, jestli bylo miocenní klima opravdu tak staticky teplé a vlhké (Zachos 2001).

Mořské pelagické prostředí je nejvhodnější pro dlouhodobý záznam kontinuální sedimentace, avšak jezerní předbřežní prostředí je vhodným zástupcem na kontinentální úrovni. Jezerní pánve, které nejsou v dosahu moře, jsou ovlivňovány především tektonikou a klimatem. Tektonika zde zajišťuje nejen přínos sedimentů ze zdrojových oblastí, ale způsobuje i subsidenci pánve a tedy tvorbu akomodačního prostoru. Klima má potom vliv na samotnou sedimentaci a s ní spojené fyzikální, chemické a biologické změny (Luzon et al., 2002). Jezerní sedimenty jsou ve srovnání s mořskými citlivějšími klimatickými archivy zejména díky větší rychlosti sedimentace. Díky lokální topografii zde také mohou regionální i lokální klimatické i geografické změny zcela setřit globální klimatický záznam. Dokážeme-li však toto lokální rušení odfiltrovat, pak nám větší rychlost sedimentace umožňuje rekonstrukci klimatických změn na časové úrovni staletí až statisíciletí.

Zemské klima se neustále vyvíjí. Mezi nejzajímavější a nejpodstatnější jevy tohoto vývoje patří oteplování a ochlazování klimatu způsobené tektonikou litosférických desek nebo periodické cykly oteplování a ochlazování klimatu spojené s orbitálními procesy. Uvědomíme-li si, že tektonika i orbitální procesy jsou v neustálém pohybu, zřejmě nás nepřekvapí, že takovéto změny klimatu existují. Z tohoto pohledu jsou ke korelaci vhodná taková proxy, která jsou citlivá na orbitální parametry. Kolísají totiž podle přesně známých periodických závislostí, které jsou spočteny pro posledních mnoho desítek milionů let, čímž poskytují rovnoměrný a tím pádem předvídatelný záznam o jisté části paleoklimatických změn. Orbitální parametry řídí klimatické změny v časovém měřítku desítek až stovek tisíc let. Oproti tomu tektonika desek je pomalejší a nepravidelná a je odpovědná za změny v měřítku jednotek až stovek milionů let. Klimatické dějiny Země jsou zrekonstruovány řadou proxy dat jak z mořských, tak z kontinentálních záznamů. Asi nejvýznamnějšími takovými záznamy jsou vývoj poměru stabilních izotopů kyslíku ($\delta^{18}\text{O}$) a uhlíku ($\delta^{13}\text{C}$) v oceánech (Zachos 2001; viz Obr. 1). Izotopy kyslíku odrážejí především objem ledovců a cirkulaci vodní páry v atmosféře, izotopy uhlíku se vztahují ke koloběhu uhlíku na planetě a tedy k obsahu atmosférického CO_2 , který má přímý vztah k míře působení skleníkového efektu na globální klima.



Obr. 1: Globální záznamy izotopů hlubokomořského kyslíku a uhlíku (Zachos 2001)

Izotopy kyslíku jsou považovány za vhodný prostředek ke zjišťování teplot na pólech. Z těchto dat vyplývá, že období svrchního oligocénu znamenalo pozvolné oteplování klimatu. Mírně se zvýšila i teplota vody u dna moří a díky oteplení došlo k redukci ledové pokrývky na Antarktidě. Globální oteplení vyvrcholilo asi před 17 – 15 Ma na konci středního miocénu a bylo následováno opětovným dlouhodobým ochlazováním a rozšiřováním antarktického ledovce, což vyústilo v bipolární zalednění v pliocénu (Zachos 2001).

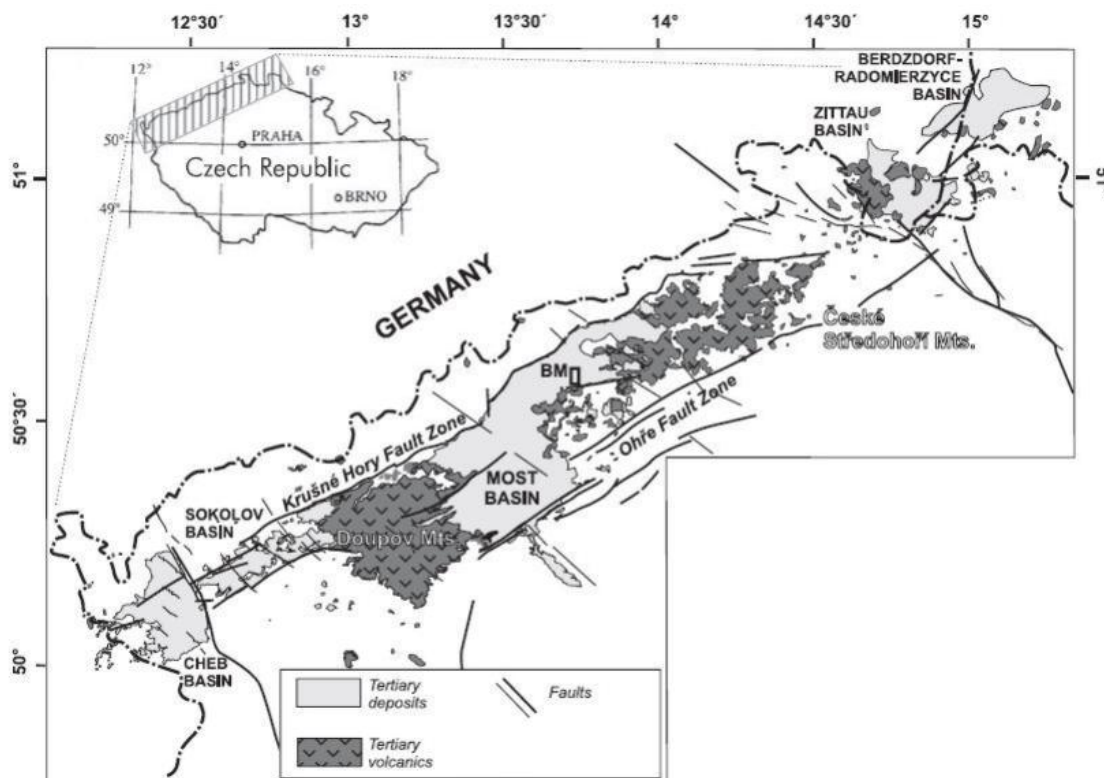
3. Cyprisové souvrství sokolovské pánve

Cyprisové souvrství se skládá takřka výhradně z litologicky homogenních jezerních jílů. Na jejich geochemických proxy datech lze identifikovat litologické změny, které jsou záznamem vývoje zdrojových oblastí sedimentů a v neposlední řadě klimatických změn.

Souvrství nazvané podle skořepatců Cypris Angusta tvoří svrchní část výplně sokolovské pánve, nacházející se v oherském riftu.

3.1 Oherský rift

Oherský rift je 30 km dlouhé tektonické příkopové pásmo (viz obr. 2). Hlavní fáze sedimentace v riftu probíhala od svrchního oligocénu do spodního miocénu, kdy byl celý oherský rift ovlivňován šikmou extenzí směru SSV (Rajchl et al., 2009). Sokolovská pánev je v něm omezena SV zlomy, které jsou vzhledem k sedimentární výplni i pánve relativně mladé. Na území oherského riftu se nalézají čtyři pánve (chebská, sokolovská, mostecká, žitavská), které jsou od sebe oddělené vulkanickými pásy a systémy zlomů. Vertikální přemístění na zlomech je více než 200 m (Rajchl-Uličný 2005). Téměř neporušené terciární sedimenty byly strmě vyvečeny na okraji pánví a provázeny primárním vyhluchnutím slojí, naproti tomu podložní horniny (ruly, pararuly) byly místy rozdrčeny a hydrotermálně alterovány. V celém svém rozsahu je pak oherský rift doprovázen bazickými vulkanity oligocénního a miocénního stáří, zejména vulkanity Doupovských hor (Pešek et al., 2010).

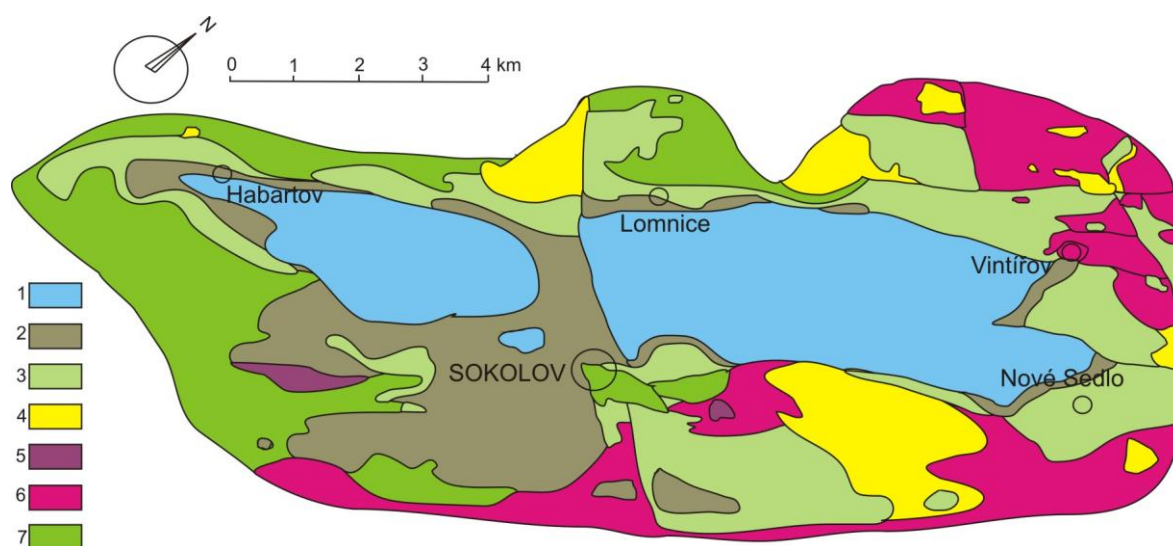


Obr. 2 Oherský rift (Rajchl et al., 2008)

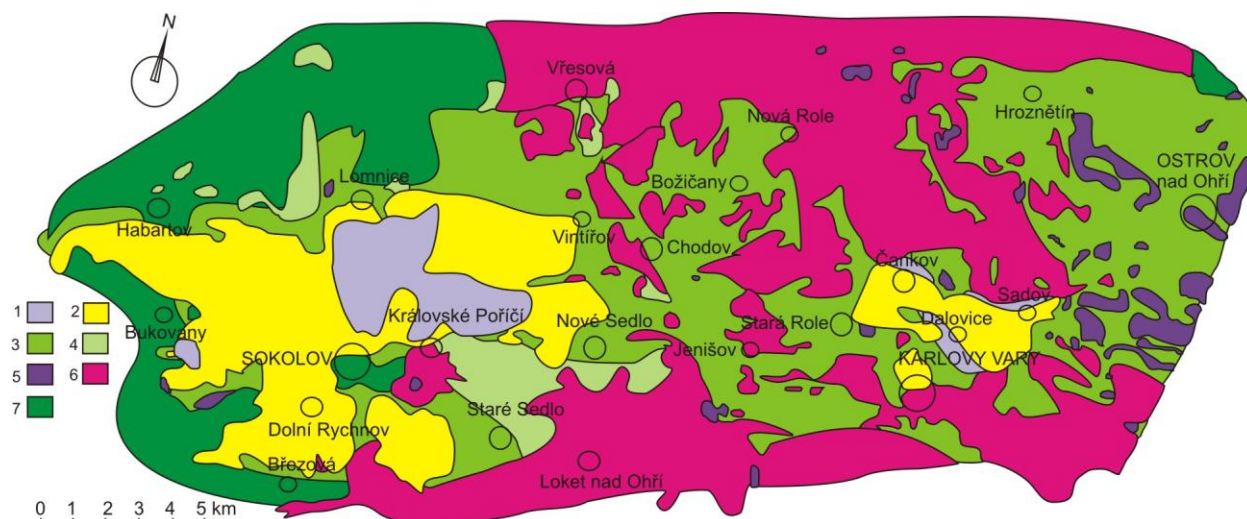
3.2 Sokolovská pánev

Sokolovská pánev je terciérní kontinentální pánev protažená směrem ZJZ-VSV s vrásově zlomovou stavbou a vulkanicko-sedimentární výplní o mocnosti max. 360 m. Pánev je dlouhá 30-36 km a široká 9 km a její stáří spadá podle předchozích výsledků paleomagnetického datování do období 24,0 – 16,5 Ma. Na jihu je ohraničena oherským (oháreckým) zlomovým pásmem, na severu stupňovitým krušnohorským zlomovým pásmem, na východě hřbetem oherského (oháreckého) krystalinika, který je překrytý vulkanity Doupovských hor a na západě je hranicí krystalinický hřbet Chlumu sv. Máří (Rojík 2004).

Podloží páneve tvoří na Z a V svory a pararuly saxothuringika, jejichž jednotlivé části dělí karlovarský pluton a terciérní vulkanity. V některých místech se vyskytují relikty terciérních sedimentů i mimo sokolovskou pánev v jejím okolí (Pešek et al., 2010).



Obr. 3 Sokolovská pánev před zahájením rozsáhlé povrchové těžby (1 – cyprisové souvrství, 2 – sokolovské souvrství, 3 – novosedelské souvrství, 4 – starosedelské souvrství, 5 – bazaltoidy, 6 – granity, 7 – metamorfity krystalinika) (podle Hokr 1958)



Obr. 4 Sokolovská pánev (1 – cyprisové souvrství, 2 – sokolovské souvrství, 3 – novosedelské souvrství, 4 – starosedelské souvrství, 5 – bazaltoidy, 6 – granity, 7 – metamorfity krystalinika) (podle Galek et al. 2004)

Tektonika

Od počátku tvoření sokolovské pánve do současnosti došlo ke stočení směru hlavního napětí o 90° z ZJZ-VSV do JJV-SSZ, což způsobilo ukončení činnosti horizontálních pohybů. Pánev je rozčleněna do oligocénních až spodnomiocénních synsedimentárních depresí směru zhruba Z-V (80°) s orientací ovlivněnou strukturami krystalinika. Tyto deprese oddělují zřetěžené hřbety krystalinika, granitů nebo vulkanitů ve směrech blízkých Z-V a SZ-JV. Příčné i podélné zlomy tvoří automorfní hrástě, příčné ve směru SZ – JV, podélné Z – V až ZJZ – VSV (Rojík 2004).

Stratigrafie souvrství sokolovské pánve

Starosedelské souvrství

Starosedelské souvrství je nejstarší terciární jednotkou na území sokolovské pánve. Na bázi diskordantně hraničí s kaolinicky zvětralým krystalinikem, s nadložními davidovskými vrstvami novosedelského souvrství ho dělí hiát s částečnou denudací. Souvrství je tvořeno bazálními křemennými konglomeráty, fluvialními pískovci, křemennými pískovci, prachovci až kaolinitovými jílovci v mladším cyklu.

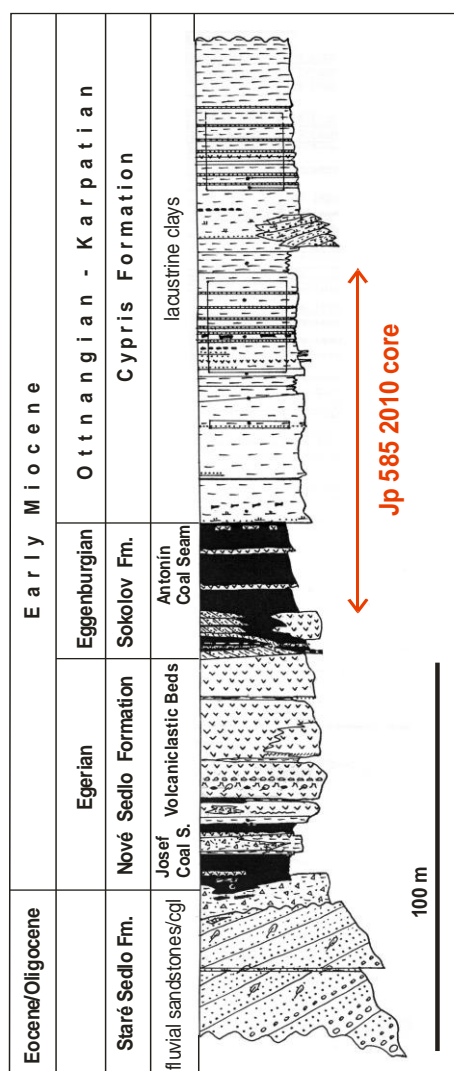
Novosedelské souvrství

Novosedelské souvrství stáří svrchního oligocénu až spodního miocénu má pestrou škálu hornin a facií. Jednotlivým rysem jsou horniny vulkanického původu a sedimenty ukládané v tektonické subsidenci sokolovské pánve. Podloží tvoří starosedelské souvrství nebo kaolinicky zvětralé krystalinikum, v nadloží je konkordantní ostrá hranice s cyprisovým souvrstvím.

Souvrství obsahuje davidovské vrstvy, uhelné vrstvy Josef, spodní vulkanické vrstvy, uhelné vrstvy Anežka, svrchní vulkanické vrstvy, habartovské vrstvy a uhelné vrstvy Antonín.

Cyprisové souvrství

Souvrství je detailněji popisováno v kapitole 3.3.



Obr. 5 Stratigrafické členění sokolovské pánve (převzato z Pešek et al., 2010)

Vulkanismus

Vulkanické centrum bylo maarového typu, kdy tlak vodní páry, pocházející z terciérních sedimentů, způsoboval exploze a následnou destrukci sopouchu a fragmentaci magmatického sloupce. Po sérii asi 200 výbuchů pokrýval okolí kužel proplyněné struskovité tefry, jehož svahy byly náchylné k sesuvům. (Rojík 2004).

Horniny vulkanického původu (vulkanoklastika) se zvýšeným obsahem Ti, V, Nb, Sr, Ba apod. se na složení terciérní výplně sokolovské pánve podílejí asi 55% (Pešek et al., 2010). Vulkanický materiál pochází z velké části především ze západní části Doupovských hor a dále z lokálních center okolí sokolovské pánve.

3.3 Cyprisové souvrství

Cyprisové souvrství získalo svůj název podle ostrakodů (skořepatců) Cypris Angusta a vznikalo ve svrchním akvitánu-burdigalu přibližně před 21,3-16,5 Ma. Jedná se převážně o jezerní jílovce, které jsou vyvinuté v chebské a sokolovské pánvi, kde tvoří nejmladší jednotku kryjící uhelnou sloj.

Prostředí permanentního a později intermitentního jezera v teplém subtropickém klimatu dalo pomalou sedimentací (asi 4,8 Ma) vzniknout laminovaným jílovcům s podstatným zastoupením kaolinitu, illitu a minerálů skupiny smektitu s příměsí karbonátů a organické hmoty. Hranice mezi podložními vrstvami sloje Antonín a cyprisovým souvrstvím je konkordantní a téměř izochronní, znamená tedy změnu sedimentačního prostředí z rašeliništního do lakustrinního (Rojík 2004). Hranice není však zcela ostrá, z čehož vyplývá, že zatopení nenastalo jednorázově, ale probíhalo v oscilacích. Naproti tomu na styku s nadložními pleistocénními sedimenty je hranice diskordantní s pozůstatky tektonických deformací, zvětrávání apod. Maximální mocnost cyprisového souvrství je v centrální části sokolovské pánve 182 m, v otovické části pánve je to 133 m (Pešek et al., 2010).

Sedimenty cyprisového souvrství jsou jezerního původu. Je tvořeno převážně jíly a jílovcí se střídavě světlejšími a tmavšími laminami s proměnlivým obsahem organické hmoty. Zejména ve střední a svrchní části se jedná o jílovce bitumenní, místy karbonátické. V cyprisovém souvrství převládá na bázi kaolinit, směrem k nadloží přibývá illitu a sericitu, které postupně převládají, ve vyšších částech souvrství se objevuje např. i montmorillonit nebo chlorit. Místy se objevují polohy pelokarbonátů, některé pravděpodobně vznikly evaporizací jako durikrusty na krátkodobě vysychajících jezerech, jiné ale byly vytvořeny primární precipitací z jezerní vody nebo pozdějšími diagenetickými procesy. Cyprisové souvrství je překryto pleistocénními sedimenty tvořenými zpravidla sprašovými a štěrkovitými hlínami (Pešek et al., 2010).

V prostředí sokolovské pánve se nacházela dvě jezera, menší v otovické části pánve a větší ve střední a západní části pánve. Zpočátku byla jezera stálá, později občasná. Převážná část cyprisového souvrství vykazuje znaky meromiktních jezer s permanentním rozvrstvením vody. Dno jezera mělo redukční prostředí, které dokazují zejména sulfidy železa, vysoký obsah organické hmoty a zachovaná laminace ukazující na nepřítomnost bioturbace. Naproti tomu velké množství řas a fosilních zbytků na vrstevních plochách jezerních sedimentů dokládá pravidelnou eutrofizaci ve svrchní části jezera. Ve střední části souvrství se vyskytuje cyklické střídání vrstev s proměnlivým obsahem organické hmoty, což je dáno eutrofizačními změnami v řádu tisíců až desetitisíců let (Rojík 2004). Jezerní voda byla převážně sladká, a to přinejmenším v jejich počáteční vývojové fázi (Kříbek et al., 1998), ale v pozdějších fázích jsou zaznamenána období se zvýšenou salinitou spojenou s výskytem evaporitů. Tato salinita mohla být způsobena usazováním látek na dně v období stagnace jezer nebo exotermní reakcí prouhelňované podložní sloje Antonín (Pešek et al., 2010). Střídáním aridnějšího a humidnějšího klimatu docházelo k oscilacím hladiny, kdy v sušších obdobích jezero vysychalo, a na dně vznikaly bahenní praskliny, které se dochovaly dokonce i uprostřed nejhlubšího depocentra (Rojík 2004). Sedimentům cyprisového souvrství zatím chybí přesné časové zařazení a odhad doby, po kterou se sediment ukládal. To by mohla objasnit magnetostratigrafie či systematická analýza geochronologie, avšak ty jsou prozatím předmětem studia.

Jílovce jsou nejčastěji planárně zvrstvené, laminované až tence laminované. Někdy jsou polohy karbonátů spojeny s polygonálními prasklinami (obr. 6), jejichž vznik může souviset s řadou faktorů, jako je vysychání, tepelná kontrakce nebo i karbonatizací (Rojík 2004).

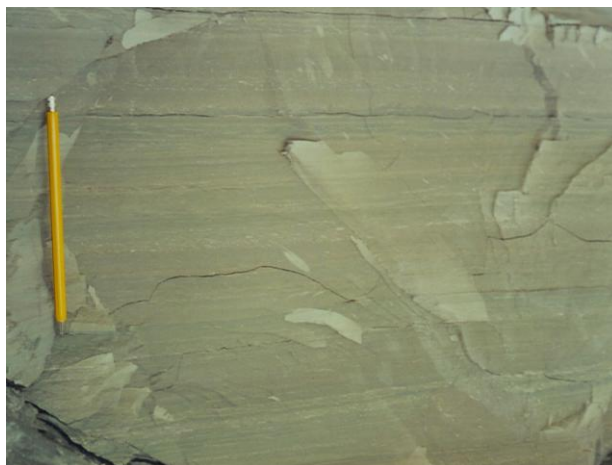


Obr. 6 Cyprisové souvrství – hlavní pelokarbonátový obzor. Svrchní vrstevní plocha pelokarbonátové polohy (dolomitizovaných jílovců) s polygonálními prasklinami a otisky řas. Lom Jiří – centrální část (Pešek et al., 2010)

Cykličnost v sedimentárním záznamu cyprisového souvrství

Cyklická sedimentace spojená se změnami insolace a klimatu je ve vnitrokontinentálních pánvích postižena rušivými vlivy mnohem více než v mořských pánvích. Cyprisové souvrství sokolovské pánve však poskytuje možnosti studia sedimentačních cyklů výjimečně dobře. Je to dáno nízkým reliéfem, pomalou sedimentací, chemickým zvětráváním a nepřítomností významných hiátů (Rojík 2004).

V cyprisovém souvrství se objevuje fenomén střídání dvou typů lamin: lamina A je světlejší, hrubozrnnější a značí rychlejší tempo sedimentace, lamina B je naopak tmavší, jemnozrnnější, zpravidla tenčí, s vyšším obsahem kerogenu (Obr. 7). Barevné odstíny lamin se liší, ale sousedící laminy jsou navzájem kontrastní (Rojík 2008). Střídání těchto lamin je pravděpodobně reakcí na sezónní změny klimatu, kdy teplejší a humidnější klima podmiňuje zvýšené obsahy organické hmoty a naopak.



Obr.7 Cyprisové souvrství (střední část): Pravidelně laminované karbonátické bitumenní jílovce, místy jsou patrné stopy čočkovitého zvrstvení. Lom Družba – centrální část (Rojík 2008)

Milankovičovy cykly

Milankovičovy (podle srbského matematika a inženýra Milutina Milankoviče) cykly jsou periodické změny orbitálních parametrů, jako jsou excentricita, výchylky zemské osy (precese a náklon), které způsobují pravidelné změny v insolaci Země, což má za následek změny teploty zemského povrchu a tudíž i klimatu (viz Obr. 8).

1. Precese (pohyb rotační osy Země vůči rovině ekliptiky s periodou 19 000 - 23 000 let)

Precese je krouživý pohyb osy Země po kuželové ploše v současnosti s úhlem asi $23,5^\circ$ s periodou 25725 let (=platónský rok). Precese ovlivňuje klima na hemisférách. Je-li osa nakloněná do perihelia,

je na dané polokouli extrémnější klima s teplejšími léty a chladnějšími zimami v afeliu (v současnosti je to jižní polokoule) a na druhé polokouli jsou výkyvy menší, tudíž klima stálější.

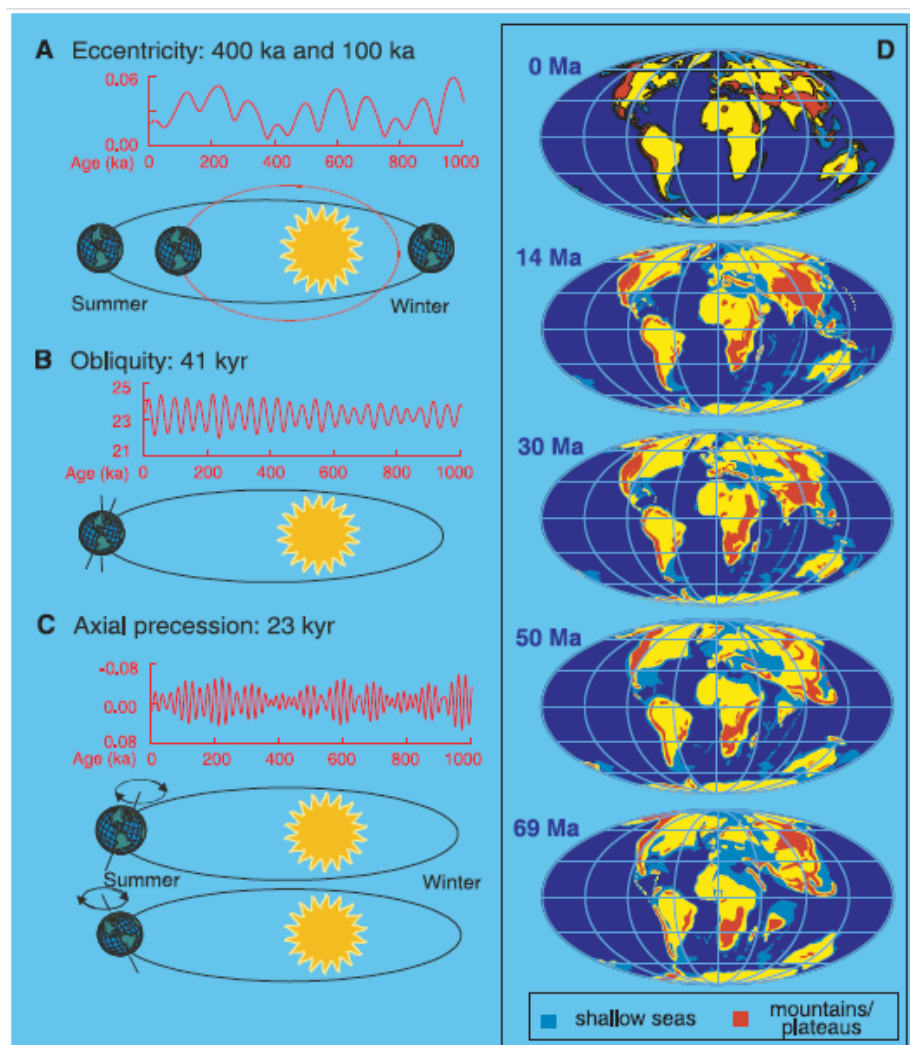
2. Náklon (změna sklonu zemské osy vůči orbitální rovině Země s periodou cca 41 000 let)

Náklon zemské osy se pohybuje v rozmezí zhruba $22 - 24,5^\circ$ od kolmice její oběžné roviny. Náklon $23,5^\circ$ způsobuje střídání ročních období. V případě, že by se náklon blížil 0° , nedocházelo by na pólech k polárním nocím a dnům, naopak v případě 90° by byla jedna polokoule půl roku ve stínu a druhého půl roku odvrácená ke Slunci.

3. Excentricita (změna výstřednosti eliptického orbitu Země kolem Slunce s periodou cca 100 000 let)

Oběžná dráha Země se mění od téměř kruhové po téměř eliptickou. Je to způsobeno interakcí Země s gravitačními poli ostatních planet obíhajících kolem Slunce, zejména Saturnu a Jupiteru.

Excentricita se tedy mění – z maximální v době, kdy se oběžná dráha blíží elipse po minimální, kdy se blíží kruhu. Změna excentricity pak způsobuje např. variace v délce ročních období.



Obr. 8 Milankovičovy cykly (Zachos 2001)

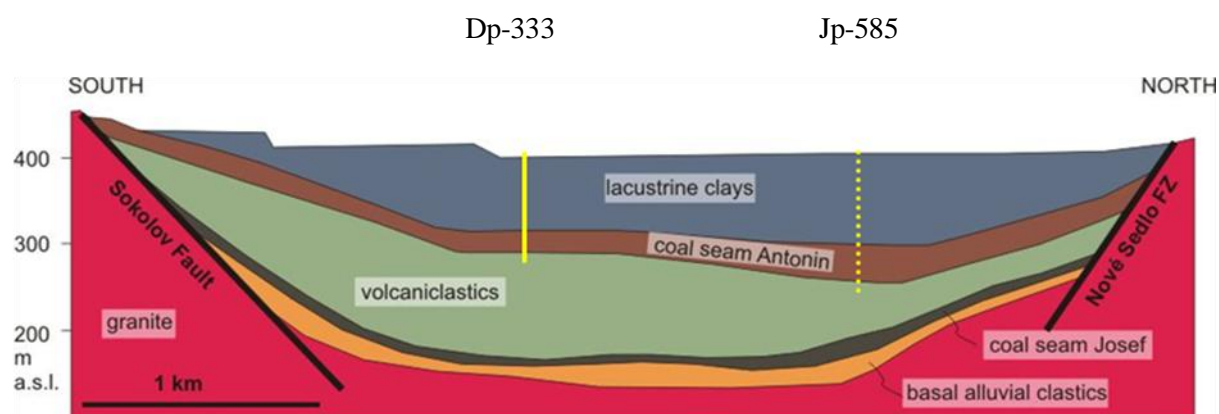
4. Paleoklimatická proxy ve vrtu Jp-585

4.1 Úvod

Zkoumáním prvkového složení laminovaných sedimentů je možné rozpoznat změny v akumulaci sedimentačního materiálu, zvýšení či snížení přítoku nebo změny ve zdrojových oblastech či v autigenních procesech v jezerním systému. A tím, že tyto změny jsou v přímém vztahu ke klimatu tektonice a vulkanismu můžeme se pokusit rekonstruovat variabilitu paleoklimatu geochemickými metodami, pokud se podaří odfiltrout tektonické a vulkanické vlivy. Například poměry Ti/Al a K/Al v detritu mohou pomoci identifikaci podílu detritického materiálu přineseného řekami nebo dokonce rozpoznat různé zdrojové oblasti. Jemnozrnné předbřežní laminované sedimenty poskytují důležitý a podrobný archiv paleoklimatických dat. Stejně tak organický materiál v jezerním nebo mořském sedimentu může posloužit jako ukazatel teploty na zemském povrchu v době jeho uložení. Nejvhodnější je samozřejmě kombinace zkoumání prvkového složení laminovaných sedimentů spolu s dalšími metodami, jako jsou například izotopy kyslíku a uhlíku nebo cyklostratigrafie (Jilbert 2008).

4.2 Data a metody

V roce 2010 byl v sokolovské pánvi v dobývacím prostoru lomu Jíří proveden vrt s názvem Jp-585 do hloubky 200 m pod současný povrch. Svrchní část tohoto vrtu je 2,05 m mocný půdní profil, na který navazuje 92,28 m mocná část jílu cyprisového souvrství, jehož podloží pak tvoří uhelná sloj Antonín. Následně se odebralo v průměru 5 vzorků z metru, čímž vznikl soubor 465 vzorků ke studiu prvkové geochemie. Ty se v první fázi výzkumu nechaly vysušit, hrubě se podrtily a odebraly se přibližně 3 g k podrobným analýzám. Tyto zlomky sedimentů se v Ústavu anorganické chemie AV v Řeži roztřely na práškovou jemnost a analyzovaly se rentgenovou fluorescenční spektrometrií (XRF) a některé vzorky také atomovou absorpční a emisní spektrometrií (CEC a AAS/AES).



Obr. 9 Umístění vrtu Jp-585

XRF – rentgenová fluorescenční spektrometrie

Vzorky byly homogenizovány v achátové třecí misce. Následně byly přibližně 2 g utřeného vzorku nasypány do měřících kyvet a analyzovány stolním spektrometrem MiniPal 4 s ED detektorem a výměníkem vzorků (PANalytical, Holandsko), kde byly ozářeny primárním rentgenovým zářením z Rh rentgenky. Toto rentgenové záření vybudí elektrony z vnitřních hladin a při deexcitaci je vyzářeno charakteristické sekundární rtg fluorescenční záření, které svojí energií odpovídá přítomným prvkům. Tím vznikne rentgenové emisní spektrum, z kterého lze vyčíst zastoupení každého obsaženého prvku. Obsahy Al a Si byly analyzovány po propláchnutí měřícího prostoru He. Měření celé škály prvků, tj. lehké, středně těžké, těžké a nejtěžší prvky, trvá 4 hodiny. To, že je v jednom měření možné analyzovat 12 vzorků naráz, nám tudíž navíc šetří čas. Vzhledem k velkému množství měřených vzorků nebyly hodnoty kalibrovány a jsou dále uváděny pouze v jednotkách c.p.s. (counts per second), což je pro účely paleoenvironmentálních proxy dostačující. Velmi podrobné měření má za cíl zejména zjistit místa změn obsahu prvků, tj. charakteru sedimentu. Kalibrace použitého spektrometru i metodiky byla v Analytické laboratoři s úspěchem prováděna v případě recentních nivních sedimentů v jiných studiích (např. Grygar et al., 2010).

Kvantitativní analýza expandabilních jílových minerálů (CEC)

Analýza expandabilních jílových minerálů je užívána pro stanovení kationtové výměnné kapacity jílových minerálů (Grygar a kol. 2009; Kadlec a kol. 2009; Meier a Kahr 1999). Metoda využívá pro kvantitativní stanovení jílových minerálů v sedimentech interakcí s roztokem $[\text{Cu}(\text{trien})]^{2+}$, což je komplex sestávající z CuSO_4 a triethylentetraminu v poměru 1:1 (Grygar a kol. 2009; Meier a Kahr 1999).

Pro analýzu bylo naváženo přibližně 150-500 mg utřeného vzorku, poté bylo přidáno 5 ml destilované vody a 5 ml roztoku $[\text{Cu}(\text{trien})]^{2+}$ a směs byla míchána po dobu 5 minut. Navážka se adjustovala aktuální kationtové výměnné kapacitě vzorku podle metodiky popsané Grygarem a kol. (2009). Následně byla suspenze přefiltrována do 50 ml odměrných baněk. Výsledný roztok byl analyzován pomocí atomového absorpčního spektrometru AAS 3 (Carl Zeiss, Jena) s plamenem acetylen-vzduch, kde se část vzniklého roztoku rozpráší do plamene, kterým prochází paprsek světla vhodné vlnové délky, a tím zjistíme obsah daného prvku. Pro naše účely byly stanoveny obsahy Cu a Mg pomocí AAS (atomová absorpční spektrometrie) a obsahy Ca, K a Na pomocí AES (atomové emisní spektrometrie).

4.3 Výsledky a interpretace

Zastoupení jednotlivých prvků a vyměnitelných kationtů ve vzorcích jílu cyprišského souvrství je prezentováno v grafu na obr. 13 (Vertikální profily).

Karbonáty

Zvýšené obsahy vápníku ve vrtu JP 585 jsou v polohách 1321, 1335, 2035, 2115, 2149, 3485 cm (č. vzorku = hloubka ve vrtu). Zvýšený obsah Sr je např. v poloze 2149 cm. Mg je jen lehce navýšen v polohách 2149 a 3485 cm. Výsledky dobře korelují s podrobným litologickým profilem od Petra Rojíka (2010):

15. poloha: Pelokarbonát světle šedý, relikty laminace, skalní konzistence:

13,37 – 0,12 m mocný horizont = 1321, 1335 cm

23. poloha: Pelokarbonát světle šedý, skalní konzistence, tlaková textura (koninkony), v úlomcích:

20,45 – 0,15 m mocný horizont = 2035 cm

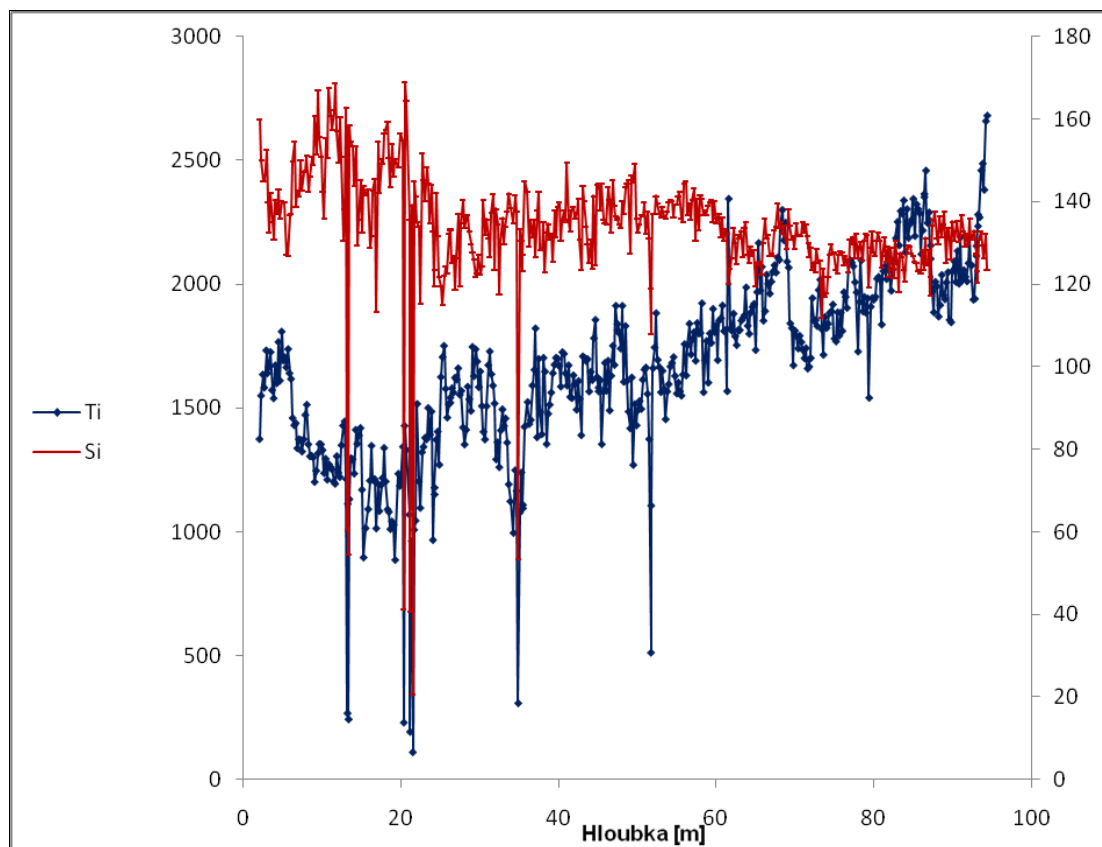
40. poloha: Pelokarbonát šedý, v úlomcích:

34,85 – 0,15 m mocný horizont = 3485 cm

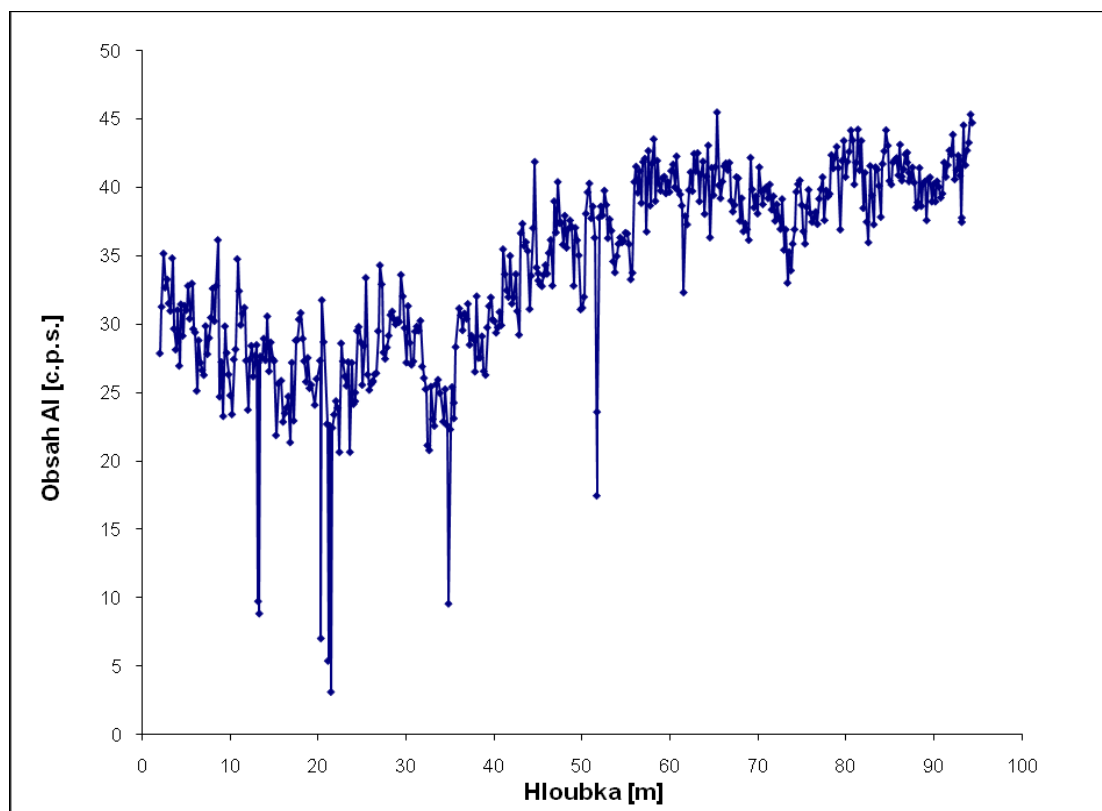
Interpretace. Polohy se zvýšeným obsahem Ca (číslo vzorku 1321, 1335, 2035, 2115, 2149, 3485) odpovídají masivním karbonátovým polohám, které mohou být tvořeny kalcitem, dolomitem, aragonitem, sideritem a ankeritem (Martínek et al., 2010), poloha se zvýšeným Sr (číslo vzorku 1321, 2035, 2115, 2149) může indikovat přítomnost aragonitu, zvýšené obsahy Mg (číslo vzorku 2149, 3485) mohou indikovat přítomnost dolomitu.

Titan, hliník, křemík a draslík

Z grafu obsahu Ti vidíme generelní trend klesajících hodnot Ti, Al, Ti/Al do nadloží (viz. obr. 13), zvláště ve spodní a střední části profilu. Naopak je patrný trend přibývání Si i poměru Si/Al ve svrchní části profilu. Výrazná (prakticky jednobodová) minima těchto prvků jsou v místech, kde převládající složkou sedimentu je karbonát.



Obr. 10 Graf obsahu Ti a Si (XRF)



Obr. 11 Graf obsahu Al (XRF)

Hodnoty Ti poměrně dobře korelují s Al. Zatímco hodnoty Si korelují s Ti a Al jen ve spodní části profilu, ve střední části profilu je zjevná postupná divergence křivek, Si zde přibývá zatímco Ti ubývá, ale hlavní velké anomálie jsou podobné. Ve svrchní části profilu je zcela zjevná negativní korelace Ti a Si (viz obr. 10)

K, K/Al

Poměr K/Al má od báze vrtu směrem k povrchu rostoucí tendenci.

Ve střední části profilu jsou krátkodobé trendy, kde se střídají nárůsty a poklesy hodnot Al/Si, Ti/Al a Ti v pozitivní korelaci a K/Al, který k nim koreluje negativně (viz obr. 13).

Interpretace. Titan a hliník jsou díky své stabilitě ideálním měřítkem obsahu detritické minerální (siliciklastické) složky sedimentu (Cohen 2003).

Směrem od báze vrtu dochází k ubývání detritu (Ti, Al, Ti/Al) a je patrný trend přibývání Si ve svrchní části profilu, což patrně odráží rostoucí příspěvek biogenního SiO₂, nejpravděpodobněji může jít např. o opál z rozsivkových schránek. Proto není korelace mezi Si/Al a Ti/Al. Maxima Si/Al by mohla značit buď obsah hrubšího, písčitého detritu, nebo vyznačují maxima obsahu biogenního SiO₂. Protože podle litologického popisu se v místech maxim Si/Al vyskytují ve spodní části profilu prachovité polohy, jedná se zde pravděpodobně o zvýšení detritického přínosu. Zatímco ve svrchní části profilu tato korelace s litologií chybí, je zde pravděpodobnější druhé vysvětlení - výrazný podíl autigenního SiO₂.

Generelní trend rostoucího K/Al a Si/Al směrem od báze vrtu negativně koreluje s Ti, Ti/Al, Al, což může značit přibývání autigenních minerálů a/nebo illitu.

V grafu obsahu Ti a Si můžeme vytyčit 3 hlavní části. Zhruba do 65 m se asi jedná o čistě siliciklastický přínos – Ti a Si korelují. Od 65 do 25 m generelní trendy stále korelují, ale je znatelné zvýšení autigenního Si, od 25 m je korelace už téměř čistě negativní, tudíž Si je zde autigenní/biogenní.

Ve střední části profilu mohou krátkodobé trendy (střídavé nárůsty/poklesy hodnot Ti/Al, Ti a K/Al, Si/Al) reprezentovat variace v přínosu siliciklastik do jezera.

CEC

Hlavní rys profilu CEC je změna poměru expandabilních jílových minerálů od malého zastoupení v dolní části vrtu po poměrně náhlé nárůsty v horní části. Mnohá jednobodová minima – podobně jako na křivkách Al, Si a Ti – odpovídají karbonátovým horizontům, které tedy obsahují minimum detritických složek.

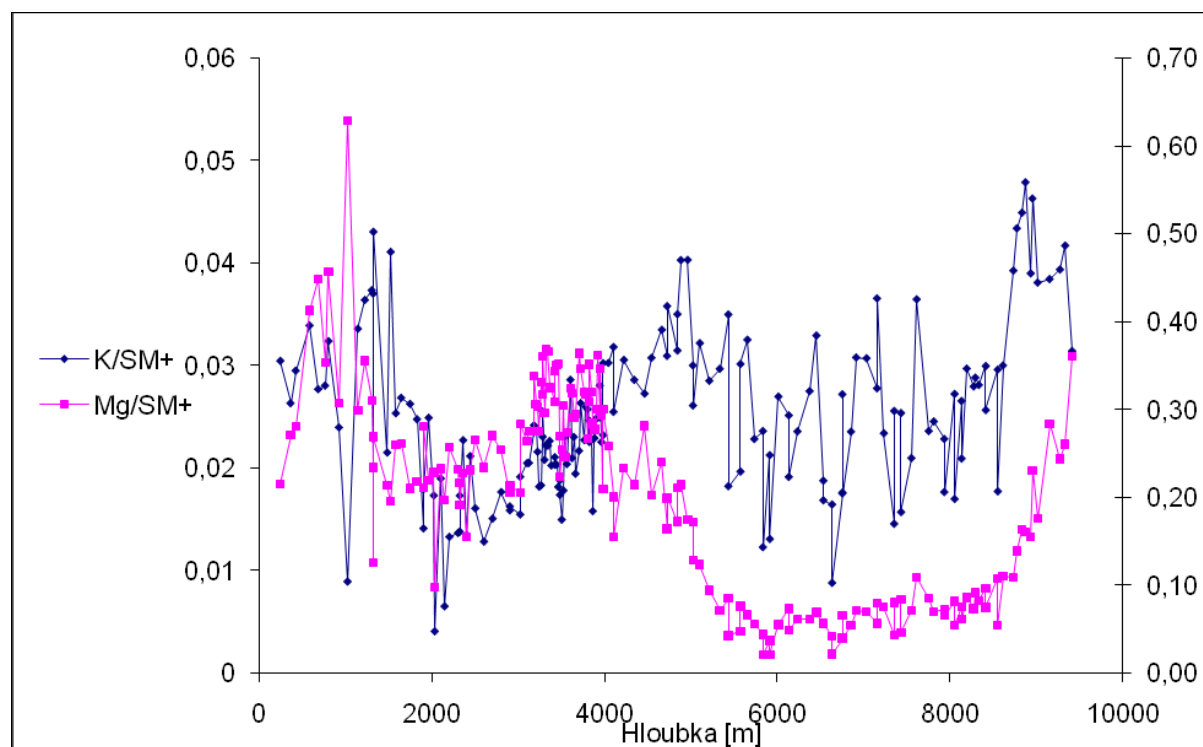
Na profilu CEC jsou velmi dobře patrné prudké nárůsty z nízkých hodnot v dolní části na vysoké ve dvou úrovních: v hloubce 4100 cm a pak další zvýšení v 3445 cm. Tyto náhlé nárůsty zřetelně rozdělují sedimenty na dvě zóny, spodní s nízkým CEC (typicky kolem 0,15 mmol(+)/g) a svrchní s vysokým CEC (většinou nad 0,2 mmol(+)/g). Tato rozhraní nejsou spojená s dramatickou změnou litologie a obsahu detritických složek.

- Mg / součet kationtů (viz Obr. 12)

Po počátečním poklesu těsně nad slojí je relativní příspěvek Mg k součtu rozpustných a iontově-vyměnitelných kationtů Ca+Mg+Na+K malý (kolem 10 %). V místě prudkého zvýšení CEC (kolem 4100 cm) je relativní příspěvek Mg iontů nejvyšší, cca kolem 35 %.

- K / součet kationtů (viz Obr. 12)

Relativní příspěvek K k součtu kationtů je ve spodní části (od hlavy sloje do cca 4100 cm) nejvyšší. V místě náhlého zvýšení CEC (kolem 4100 cm) pozvolna klesá.



Obr. 12 Graf obsahu Mg/SM+ a K/SM+ (CEC)

4.4 Diskuse výsledků

Chemostratigrafické dílčí jednotky a jejich interpretace

Předpokládáme, že podmínky v jezeře byly po celou dobu sedimentace profilu, který jsme analyzovali, zhruba podobné, bez dramatických změn, protože takové změny by byly jasně vidět na litologickém popisu (dlouhodobé hiáty, diskordance, dlouhodobé vyschnutí jezera spojené se subaerickou expozicí sedimentu). V případech spíše pozvolných změn se k popisu jezerních sedimentů hodí výsledky číselných charakteristik jejich složení nebo nějakých snadno měřitelných vlastností. Pro tyto účely jsou vhodná právě proxy data, tj. číselné výsledky měření pokud možno s velkou hustotou dat a malým hloubkovým krokem. Tyto charakteristiky často umožňují v sedimentu identifikovat i menší, kvantitativní změny. Toho se dnes využívá k popisu poměrně monotónních sedimentárních profilů, k jejich stratigrafické korelaci, a po pochopení důvodu, proč k těmto kvantitativním změnám došlo, taky například k paleoklimatické interpretaci sedimentárního záznamu.

V případě vrtu JP-585 můžeme pomocí dat z XRF a CEC navrhnout hranice jednotlivých zón:

Interval 1

- 94 – 67 m
- nízký K/Al, kolísající Ti/Al, vysoký Al/Si, střední CEC, korelace Si s Al i Ti

Interval 2

- 65 – 40 m
- roste K/Al, stabilně nízký Ti/Al, klesá Al/Si, roste CEC, mírný nárůst Si

Interval 3

- 40 – 24 m
- skok CEC, vysoký Ti/Al, mírně klesající K/Al, relativně stabilní Si

Interval 4

- 25 – 6 m
- jen místní maxima

Diskuse

Hodnoty Ti a Si byly normalizované Al, aby se eliminovalo „naředění“ detritických (siliciklastických) složek autigenními komponentami (např. karbonáty, biogenním opálem, organickou hmotou) a mohly být použity jako proxy detritického přínosu a rychlosti eroze v povodí (Cohen 2003)

Interval 1

V rozmezí 94 až 70 m je vysoký Ti, Ti/Al, střední CEC a nízký K/Al a Si/Al s místními výkyvy lze interpretovat jako dominanci alochtonního materiálu, tzn. relativně vysokou erozi ve zdrojové oblasti s přínosem velkého množství detritického sedimentu. To lze interpretovat jako teplé humidní období. Krátkodobější výkyvy by mohly značit autochtonní procesy – např. přestavbu delty nebo náhlé (tektonické) změny ve zdrojové oblasti.

Interval 2

Pro počátek intervalu 2 je typický výrazný rychlý nárůst Ti a Ti/Al. Mezi 70. a 40. metrem hloubky postupně ubývá Ti/Al a naopak pozvolna přibývá K/Al a Si/Al s krátkodobými výkyvy. Začíná se zde pravděpodobně uplatňovat zvýšený podíl autigenního SiO_2 a dalších autigenních minerálů. To lze interpretovat jako úbytek detritického přínosu během snižujících se srážek.

Hranice intervalu 2 a 3 je charakteristická výrazným nárůstem CEC (poznámka: to se zdá být v souladu s nepublikovaným sdělením p. Rojíka o tom, že analýzu použili k rozlišení vrstev s vyšším obsahem expandabilních jílových minerálů, které se používají jako speciální jílová surovina ve středu cyprisového souvrství

Interval 3

Od 40. metru je patrný velmi rychlý nástup nového chemostratigrafického intervalu, který je charakteristický vysokým Ti/Al, mírně klesajícím K/Al a Si/Al. To lze vysvětlit zvýšenou erozí ve zdrojové oblasti způsobenou např. návratem humidnější periody.

Interval 4

Interval 4 je charakteristická zvýšeným obsahem Si/Al, Ca, K/Al a poklesem Ti, Ti/Al. Patrný je nárůst autigenního materiálu, pravděpodobně díky výraznému poklesu humidity.

Nejvyšších 6 metrů vrtu je postiženo zvětráváním a jeho geochemický záznam se obtížně interpretuje.

Patrný generelní trend ubývání detritu, přibývání autigenních minerálů, zvyšování alkalinity vody (Martínek et al. 2010) lze nejjednodušeji vysvětlit jako trend postupného oteplování klimatu a aridizace. Nedostatek evaporických salin nebo stop po vysychání ukazuje na stálé jezerní podmínky (Jimenez-Moreno et al 2007).

Zkoumání klimatického vývoje může být v tomto případě ztíženo tektonikou, tudíž je třeba zkoumat každý interval zvlášť. V tomto případě je velmi perspektivní analýza cykličnosti K/Al v intervalu 2, kterou se zabývá Mgr. Jiří Laurin, Ph.D. z Geofyzikálního ústavu AVČR.

5. Závěry

Geochemická proxy data jezerních jílových cyprisových souvrství se ukázala být poměrně dobrým záznamem vývoje zdrojových oblastí sedimentů a klimatických změn ve spodním miocénu. S pomocí analýzy XRF je dobře znát např. pokles obsahu siliciklastik ve prospěch autigenního SiO_2 , karbonátů a dalších autigenních minerálů ve svrchní části profilu. Analýza CEC potom ukazuje velmi rychlé změny v obsahu expandabilních jílových minerálů, přičemž nejmarkantnější „skok“ je kolem 40. metru hloubky. Kombinace XRF a CEC nakonec umožnila navrhnout 4 dílčí chemostratigrafické jednotky. Hranice mezi některými z nich jsou poměrně ostré, což zřejmě znamená podstatné změny ve vývoji jezera. Ty jsou předběžně interpretovány jako klimatické změny. Odpovědi na otázku zda se jedná skutečně o globální změny, tedy např. klimatické, by pomohla korelace s předešlým vrtem Dp333 z roku 2009 z lomu Družba, kterému bych se chtěla věnovat v diplomové práci.

Seznam použité literatury:

Cohen A. S., 2003, Geochemical Archives in Lake deposits, 241-246. In: Cohen ed., *Paleolimnology: The History and Evolution of Lake Systems*, Oxford University Press, USA, pp. 528.

Grygar T., Kadlec J., Žigová A., Mihaljevič M., Nekutová T., Lojka R., Světlík I., 2009. Chemostratigraphic correlation of sediments containing expandable clay minerals based on ion exchange with Cu(II) triethylenetetramine. *Clays and Clay Minerals*, 57: 168–182.

Grygar T., Světlík I., Lisá L., Koptíková L., Bajer A., Wray D.S., Ettler V., Mihaljevič M., Nováková T., Koubová M., Novák J., Máčka Z., Smetana M., 2010. Geochemical tools for the stratigraphic correlation of floodplain deposits of the Morava River in Strážnické Pomoraví, Czech Republic from the last millennium. *Catena*, 80, 106-121

Hay W. W., Soeding E., DeConto R. M., Wold Ch. N., 2002, The Late Cenozoic uplift – climate change paradox. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 91: 746-774

Jilbert T., 2008, Laminated sediments as archives of short timescale climate change and paleoceanography of the Mediterranean. MS PhD Thesis, Universiteit Utrecht, pp. 98.

Kadlec J., Grygar T., Světlík I., Ettler V., Mihaljevič M., Diehl J. F., Beske-Diehl S., Svitavská-Svobodová H., 2009. Morava River floodplain development during the last millennium, Strážnické Pomoraví, Czech Republic. *Holocene*, 19: 499–509.

Kříbek B., Strnad M., Boháček Z., Sýkorová I., Čejka J., Sobalík Z., 1998. Geochemistry of Miocene lacustrine sediments from the Sokolov Coal Basin (Czech Republic). *International Journal of Coal Geology*, 37: 207-233

Luzón A., González A., Muñoz A., 2002. Upper Oligocene-Lower Miocene shallowing-upward lacustrine sequences controlled by periodic and non-periodic processes (Ebro Basin, northeastern Spain). *Journal of Paleolimnology*, 28, 441-456.

Martínek K., Laurin J., Rojík P., Kříbek B., Knésl I., Bábek O., 2010. Orbital climate forcing of lacustrine offshore clays in the Lower Miocene continental Sokolov Basin, Eger Graben, Czech Republic. 18th International Sedimentological Congress, 27 Sep – 1st Oct, Mendoza, Argentina.

Meier L. P., Kahr P., 1999. Determination of the cation exchange capacity (CEC) of clay minerals using the complexes of copper (II) ion with triethylenetetramine and tetraethylenepentamine. *Clays and Clay Minerals*, 47: 386-388.

- Rajchl M., Uličný D., 2005. Depositional record of an avulsive fluvial system controlled by peat compaction (Neogene, Most Basin, Czech Republic). *Sedimentology*, 52, 601-625.
- Rajchl M., Uličný D., Mach K., 2008. Interplay between tectonics and compaction in a rift-margin, lacustrine delta system: Miocene of the Eger Graben, Czech Republic. *Sedimentology*, 55, 1419-1447
- Rajchl M., Uličný D., Grygar R., Mach K., Evolution of basin architecture in an incipient continental rift: the Cenozoic Most Basin, Eger Graben (Central Europe). *Basin Research*, 21, 269-294.
- Rojík P. (2004a): Tektonosedimentární vývoj sokolovské pánve a její interakce s územím Krušných hor. MS Disertační práce. Univerzita Karlova, pp. 227.
- Rojík, P. (in press): Co vypovídají uloženiny sokolovské pánve o proměnách klimatu?. *Zpravodaj Hnědé uhlí*, 2/2008, Most.
- Rojík P., 2010, Sokolovská pánev, 138-206. In Pešek ed., *Terciární pánve a ložiska hnědé uhlí České republiky*, Vydavatelství České geologické služby, Praha, pp. 438.
- Tell G., Zamaloa M. C., 2004. A Miocene algal assemblage dominated by *Pediastrum leonesis* n. sp. (Chlorophyceae) from Patagonia, Argentina: paleoenvironmental implications. *Journal of Paleolimnology*, 32, 247-254.
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K., 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292, 686-693.